

5

Torres pré-fabricadas de betão para suporte de turbinas eólicas

Carlos Chastre¹ & Válder Lúcio²

Universidade NOVA de Lisboa, Portugal

5.1 Introdução

O vento ocorre devido a diferenças de pressão na atmosfera, criadas pelo aquecimento desigual do sol na superfície terrestre. Desde tempos imemoriais que as pessoas têm aproveitado a energia do vento. Por volta de 5000 a.C. já havia barcos à vela no Rio Nilo e durante os séculos XV e XVI já os Portugueses velejavam por todo o mundo. A energia do vento é uma fonte renovável de energia e tem sido aproveitada ao longo dos tempos para moer os cereais, bombear água ou colocar maquinaria em funcionamento.

Em 200 a.C. há registo de moinhos simples de vento na China para bombagem de água e moinhos de vento de eixo vertical com velas para moer

¹ Engenheiro Civil, Mestre em Eng. de Estruturas, Doutorado em Eng. Civil.
Professor Auxiliar na Universidade NOVA de Lisboa, Portugal.
Membro da Comissão 6 - Prefabrication da *fib*.

² Engenheiro Civil, Mestre em Eng. de Estruturas, Doutorado em Eng. Civil
Pró-Reitor da Universidade NOVA de Lisboa.
Professor Associado na Universidade NOVA de Lisboa, Portugal.
Sócio Gerente da empresa VERSOR - Consultas, Estudos e Projetos Lda.
Membro da Comissão 6 - Prefabrication da *fib*. Coordenador do TG 6.14 da *fib*.

cereais na Pérsia e no Médio Oriente. Novas formas de usar a energia do vento foram-se espalhando pelo mundo. Por volta do século XI, as pessoas no Médio Oriente usavam moinhos de vento de forma generalizada para a produção de alimentos e certamente os mercadores e os cruzados trouxeram esta ideia para a Europa (Figura 5.1). Os holandeses redesenharam os moinhos de vento e adaptaram-nos para drenar lagos e pântanos no delta do rio Reno (Figura 5.2).



Figura 5.1 Moinho de vento referido em manuscrito medieval, datado de 1340 [3].



Figura 5.2 Moinhos de vento nos Países Baixos, constantes de pintura medieval [3].

Nas imagens seguintes mostram-se alguns tipos de moinhos de vento existentes por toda a Europa.



Holanda



Moulbaix, Bélgica



Warwickshire, Inglaterra



Ville-Pommerœul, Bélgica



Lund, Suécia



Cabanas de Torres, Portugal

Figura 5.3 Moinhos de vento na Europa [3]

Os colonizadores levaram esta tecnologia para o Novo Mundo e no final do século XIX começaram a usar moinhos de vento para bombear água para fazendas e ranchos (Figura 5.4) e, posteriormente, para gerar eletricidade nas casas e na indústria.

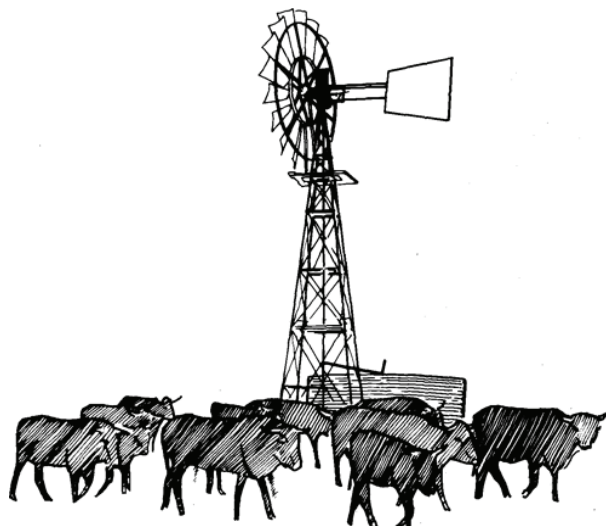


Figura 5.4 Moinho de vento para bombear água

A industrialização, primeiro na Europa e depois na América, levou a um declínio gradual no uso de moinhos de vento. Na Europa as máquinas a vapor substituíram os moinhos de vento no bombeamento de água.

Na década de 1930, os programas de eletrificação rural levaram a energia elétrica de baixo custo para a maioria das áreas rurais nos Estados Unidos [1]. No entanto, a industrialização também provocou o desenvolvimento de moinhos de vento maiores para gerar eletricidade. Usualmente apelidadas de turbinas ou geradores eólicos, estas máquinas apareceram na Dinamarca por volta de 1890.

A popularidade da energia eólica tem oscilado com o preço dos combustíveis fósseis. Quando os preços do combustível caíram depois da Segunda Guerra Mundial, o interesse por turbinas eólicas diminuiu. Mas quando o preço do petróleo disparou em 1970, o interesse mundial nos geradores de turbinas eólicas aumentou significativamente. A seguir ao embargo do petróleo na década de 1970 a investigação e desenvolvimento em turbinas eólicas permitiu refinar velhas ideias e introduzir novas formas de converter energia eólica em energia útil. Muitas dessas abordagens têm sido demonstradas em parques eólicos em *onshore* e *offshore*, quer na Europa quer nos Estados Unidos [1].

5.2 O mercado atual da energia eólica

Hoje em dia, a experiência de mais de duas décadas de funcionamento dos parques eólicos, juntamente com a continuação da investigação e desenvolvimento, fizeram com que a eletricidade gerada pelo vento se aproximasse muito do custo da produção da energia convencional. A energia eólica é a fonte de energia com crescimento mais rápido no mundo, fornecendo a indústria, o comércio e as residências com energia limpa e renovável (Figura 5.5).

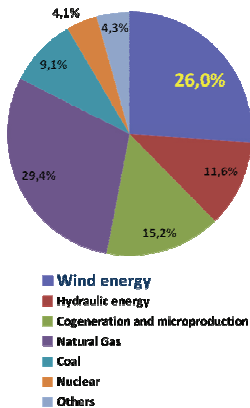


Figura 5.5 Distribuição típica dos custos de energia no mês de julho de 2010 num escritório em Lisboa (à esquerda). Parque eólico em Torres Vedras, Portugal (à direita).

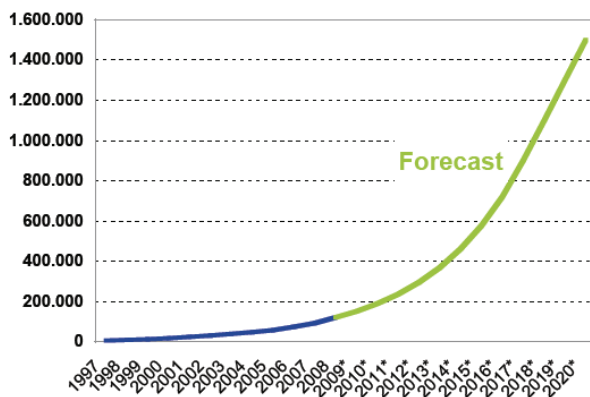


Figura 5.6 Previsão da evolução da produção de energia eólica (MW) até 2020 [5]

Na Figura 5.6 mostra-se um gráfico com a previsão da evolução da produção da energia eólica a nível mundial, constatando-se um crescimento exponencial a nível mundial até 2020. De acordo com o relatório anual de 2008 da World Wind Energy Association [5] é possível estimar um volume total de negócios na área da construção de torres para suporte de geradores eólicos de 132 bilhões de euros até 2020.

5.3 Soluções estruturais para suporte de geradores eólicos

Ao longo dos tempos os moinhos de vento começaram por ser construídos em madeira ou em alvenaria de pedra com a revolução industrial apareceram as primeiras estruturas treliçadas metálicas e só no século XXI o betão armado aparece como material alternativo. Durante o século XX foram propostas diversas soluções estruturais e métodos construtivos para torres, de modo a suportar geradores eólicos a grande altura. São soluções correntes os mastros espiados, cascas metálicas, estruturas com perfis de aço, torres com estruturas em parede de betão betonada no local ou pré-fabricada, torres híbridas de betão e cascas metálicas, até torres com materiais compósitos.

As principais ações a considerar na estrutura são: i) as forças do vento nas pás da turbina e na própria estrutura; ii) o peso da turbina e o peso próprio da estrutura; iii) os efeitos dinâmicos do vento e dos equipamentos; iv) as ações sísmicas; e v) o efeito das correntes e das marés no caso de estruturas *offshore*.

As fundações, normalmente de grandes dimensões, dependem obviamente do local onde se pretende implementar o parque eólico. Se for *onshore* podem-se ter fundações como as mostradas na Figura 5.7 para o caso de torres com a estrutura tubular e de menores dimensões por poderem ser individuais, no caso de se tratar de estruturas treliçadas.

Atualmente, as soluções existentes para *offshore* são bastantes dispendiosas e dividem-se entre as flutuantes, utilizadas em águas profundas (Figura 5.8) e as utilizadas em águas pouco profundas e que funcionam por gravidade, como as fundações em caixão ou as fundações em cálice pré-fabricadas em betão e que se apresentam na Figura 5.9. Existem outras soluções como as que recorrem a estacas, as que têm forma de tripé ou as treliçadas.



Figura 5.7 Fundações (onshore) de grandes dimensões sobre as quais será colocado o fuste tubular da torre para suportar a turbina eólica



Figura 5.8 Fundações flutuantes a utilizar em águas profundas



Figura 5.9 Fundações em cálice pré-fabricadas para águas pouco profundas no topo das quais será encaixada a torre para suportar a turbina eólica [1]

Para o suporte de geradores eólicos têm sido utilizadas, em especial, as torres metálicas com aduelas cilíndricas ou troncocônicas montadas no local e fixadas à fundação de betão armado através de chumbadores e entre si através de parafusos.

As expectativas para o futuro da energia eólica passam pelo desenvolvimento de turbinas cada vez mais potentes (superiores a 6MW), com o consequente aumento da altura das torres. A evolução nos últimos anos da potência das turbinas, com o inerente aumento do diâmetro das pás tem levado a um aumento significativo da altura das torres. Na Figura 5.10 pode-se constatar que em 1990 as turbinas permitiam produzir 500kW, com um diâmetro das pás de 40m e uma altura das torres de 54m; Em 2000 a capacidade das turbinas alcançou os 2000kW, com um diâmetro das pás de 80m, atingindo-se, em 2005, turbinas com 5000kW para um diâmetro das pás de 124m e uma altura das torres de 114m.

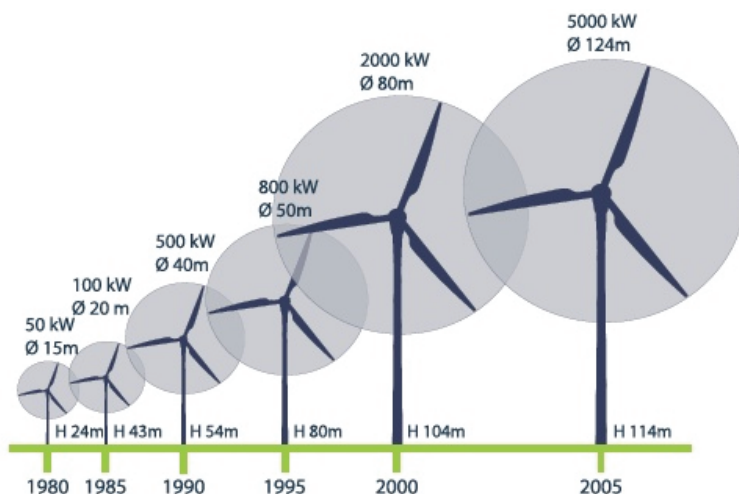


Figura 5.10 Evolução da altura das torres com a potência das turbinas

A necessidade de aumentar a altura das torres, com o consequente aumento do diâmetro e da espessura das paredes, assim como da quantidade de aço, tem encontrado crescentes limitações à utilização das torres metálicas, quer pelo custo do aço cujo preço tem grandes flutuações no mercado, quer pelas limitações de produção e transporte relacionadas com as dimensões das aduelas requeridas para torres com altura superior a oitenta metros.



Figura 5.11 Transporte do fuste metálico de uma torre (à esquerda) para suporte de turbinas eólicas no parque de Scout Moor em Inglaterra (à direita) [4].

Face a estes novos limites, algumas das características das torres metálicas perdem as vantagens referidas, designadamente: o diâmetro máximo da base da torre, por questões de transporte, não pode exceder os 4,30 metros, o que representa um obstáculo insuperável para o aumento da altura torre; com o aumento da altura da torre e face às limitações dimensionais referidas as torres metálicas tornam-se estruturalmente mais sensíveis a fenómenos de fadiga, de instabilidade, de flexibilidade e de deficiente comportamento dinâmico para a ação do vento e para as ações dos sismos, por reduzida ductilidade do seu comportamento, para além da exigência de fundações mais pesadas.

Apesar de terem evoluído para alturas ligeiramente superiores às torres metálicas, as torres de betão com aduelas pré-fabricadas continuam limitadas pelo diâmetro máximo da base da torre e necessitam, para a sua montagem, de gruas extremamente altas. As torres com paredes de betão betonadas no local apresentam a desvantagem de o processo construtivo ser bastante demorado, situações que oneram bastante o custo final da torre. Atendendo às expectativas futuras para o desenvolvimento da energia eólica *onshore* e *offshore*, constata-se que o mercado necessita de torres eólicas cada vez maiores e que as soluções atualmente existentes no mercado não resolvem completamente esta necessidade.



*Figura 5.12 Torre em betão pré-fabricado para suporte de turbina eólica (à esquerda) [4].
Aduelas pré-fabricadas típicas deste tipo de estrutura (à direita).*

Para responder a este importante nicho de mercado concebeu-se uma torre treliçada pré-fabricada em betão armado (Figura 5.13), baseada no know-how dos autores. Esta solução permite uma montagem rápida da torre utilizando elementos pré-fabricados em betão fáceis de transportar.

A torre treliçada é composta por elementos pré-fabricados que constituem uma treliça espacial a qual se prefigura como uma alternativa viável para torres acima dos 80m de altura e extremamente competitiva em termos económicos. Esta solução estrutural tem a grande vantagem de não ser condicionada pela bitola dos transportes, o que proporciona liberdade na escolha da geometria da torre, permitindo a otimização da capacidade resistente e controlo da frequência natural de vibração, apresentando uma significativa poupança nos custos da fundação, especialmente em terrenos brandos. Os autores submeteram um processo de patente desta ideia em diversos países, incluindo Portugal e o Brasil. Em 2009 esta solução ganhou o prémio *BES inovação* na categoria “Novos materiais e tecnologias industriais”, em Portugal.



Figura 5.13 Torre treliçada pré-fabricada em betão armado desenvolvida pelos autores para onshore (à esquerda) e offshore (à direita).

5.4 Torres pré-fabricadas em betão para suporte de geradores eólicos

As torres pré-fabricadas podem ser compostas por:

- i) aduelas pré-fabricadas com juntas horizontais e normalmente pré-esforçadas na vertical (Figura 5.14);
- ii) aduelas semicirculares na base da torre e aduelas fechadas no topo, com juntas verticais e horizontais e normalmente pré-esforçadas na vertical (Figura 5.17);
- iii) estrutura treliçada de elementos pré-fabricados e pré-esforçados ligados em conjunto (Figura 5.13).

As soluções estruturais em betão pré-fabricado para suporte de turbinas eólicas possuem indiscutíveis vantagens em relação às soluções metálicas, evidenciando-se as seguintes:

- Capacidade de alcançar grandes alturas e suportar geradores de grande potência *onshore* e *offshore*;
- Melhoria do comportamento dinâmico, reduzindo a fadiga, aumentando a vida útil do equipamento e reduzindo a manutenção;
- Ligações estruturais fiáveis, testadas, livres de manutenção, de rápida execução e proporcionando todas as vantagens do monolitismo estrutural;
- Excelente resposta às ações sísmicas, graças à elevada ductilidade e amortecimento estrutural, contrastando com as torres metálicas;
- Reduzida necessidade de manutenção em contraste com torres metálicas;
- Maior durabilidade destas estruturas de betão em relação às torres metálicas, em particular em ambientes marítimos;
- Menor ruído gerado pelo efeito de amortecimento do betão;
- Redução das emissões de CO₂ na fabricação da torre (entre 55 e 65% das emissões envolvidas na fabricação de uma torre metálica);
- O material das torres é totalmente reciclável;
- A durabilidade do betão das torres é muito mais elevada que a dos equipamentos de geração. Isto permite a futura substituição dos geradores eólicos por outros de maior potência, multiplicando as possibilidades de amortização do custo da obra e da infraestrutura de transporte de energia, especialmente onerosa *offshore*.

Os diferentes sistemas de aduelas variam com o tipo de ligações utilizadas na altura da aduela. Outros sistemas utilizam aduelas semicirculares na base das torres, onde o diâmetro da torre é grande no sentido de ter elementos pré-fabricados menores para simplificar o transporte. Nas Figura 5.14 Figura 5.18 mostram-se alguns pormenores das ligações entre as aduelas verticais e horizontais existentes em estruturas tubulares pré-fabricadas de betão para suporte de turbinas eólicas.



Figura 5.14 Aduelas pré-fabricadas com juntas horizontais (fonte: Enercon)



Figura 5.15 Aduelas pré-fabricadas de betão com a porta na base da torre (fonte: Enercon)



Figura 5.16 Ligações horizontais entre duas pré-fabricadas de betão (fonte: Enercon)



Figura 5.17 Aduelas semicirculares pré-fabricadas em betão na base da torre, com juntas verticais e horizontais



Figura 5.18 Pormenor de uma junta vertical

Referências bibliográficas

- [1] Tricklebank, A. H. et al. Concrete towers for onshore and offshore wind farms - conceptual design studies, The Concrete Centre, UK, 2007.
- [2] US Department of Energy. Retirado em outubro 15, 2010 de
http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/wind_history.html
- [3] Wikimedia commons. Retirado em outubro 15, 2010 de
<http://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=Special:Search&limit=20&offset=40&redirs=1&profile=default&search=wind+mills>
- [4] Wikimedia commons. Retirado em fevereiro 15, 2012 de
<http://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=Special:Search&limit=20&offset=40&redirs=1&profile=default&search=wind+mills>
- [5] World wind energy report 2008, World Wind Energy Association WWSA, 2009.

